



“十二五”江苏省高等学校重点教材

总主编 姚天扬 孙尔康

化工原理简明教程

主 编 赵宜江 李 琳



“十二五”江苏省高等学校重点教材

编号：2013-2-051

化工原理简明教程

总主编 姚天扬 孙尔康

主 编 赵宜江 李 琳

副主编 王百军 沈玉堂

参 编 (按姓氏笔画为序)

石建东 朱安峰 朱 媛 吴飞跃

杨东娅 李梅生 张 勤 周守勇

姜 航 顾焰波 嵇岳明

主 审 钟 秦

TQ02-03
101

图书在版编目(CIP)数据

化工原理简明教程 / 赵宜江, 李琳主编. —南京:
南京大学出版社, 2014. 10

高等院校化学化工教学改革规划教材

ISBN 978-7-305-14007-5

I. ①化… II. ①赵… ②李… III. ①化工原理—
高等学校—教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 227208 号

出版发行 南京大学出版社

社 址 南京市汉口路 22 号

邮编 210093

出版人 金鑫荣

丛 书 名 高等院校化学化工教学改革规划教材

书 名 化工原理简明教程

主 编 赵宜江 李琳

责任编辑 郭琼 蔡文彬

编辑热线 025-83686531

照 排 江苏南大印刷厂

印 刷 南京京新印刷厂

开 本 787×960 1/16 印张 24.5 字数 520 千

版 次 2014 年 10 月第 1 版 2014 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-305-14007-5

定 价 46.00 元

网 址: <http://www.njupco.com>

官方微博: <http://weibo.com/njupco>

官方微信号: njupress

销售咨询热线: (025)83594756

* 版权所有, 侵权必究

* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购
图书销售部门联系调换

编委会

总主编 姚天扬(南京大学)

孙尔康(南京大学)

副总主编 (按姓氏笔画排序)

王 杰(南京大学)

左晓兵(常熟理工学院)

石玉军(南通大学)

许兴友(淮阴工学院)

邵 荣(盐城工学院)

周诗彪(湖南文理学院)

郎建平(苏州大学)

钟 秦(南京理工大学)

赵宜江(淮阴师范学院)

赵 鑫(苏州科技学院)

姚 成(南京工业大学)

姚开安(南京大学金陵学院)

柳闽生(南京晓庄学院)

唐亚文(南京师范大学)

曹 健(盐城师范学院)

编 委 (按姓氏笔画排序)

马宏佳

王济奎

王龙胜

王南平

许 伟

朱平华

华万森

华 平

李 琳

李心爱

李巧云

李荣清

李玉明

沈玉堂

吴 勇

汪学英

陈国松

陈景文

陆 云

张莉莉

张 进

张贤珍

罗士治

周益明

赵朴素

赵登山

宣 婕

夏昊云

陶建清

缪震元

序

教材建设是高等学校教学改革的重要内容,也是衡量教学质量提高的关键指标。高校化学化工基础理论课教材在近几年教学改革中取得了丰硕成果,编写了不少有特色的教材或讲义,但就其内容而言基本上大同小异,在编写形式和介绍方法以及内容的取舍等方面不尽相同,充分体现了各校化学基础理论课的改革特色,但大多数限于本校自己使用,面不广、量不大。由于各校化学基础课教师相互交流、相互讨论、相互学习、相互取长补短的机会少,各校教材建设的特色得不到有效推广,不能实施优质资源共享;又由于近几年教学经验丰富的老师纷纷退休,年轻教师走上教学第一线,特别是江苏高校广大教师迫切希望联合编写有特色的化学化工理论课教材,同时希望在编写教材的过程中,实现教师之间相互教学探讨,既能实现优质资源共享,又能加快对年轻教师的培养。

为此,由南京大学化学化工学院姚天扬、孙尔康两位教授牵头,以地方院校为主,自愿参加为原则,组织了南京大学、南京理工大学、苏州大学、南京师范大学、南京工业大学、南京邮电大学、南通大学、苏州科技学院、南京晓庄师院、淮阴师范学院、盐城工学院、盐城师范学院、常熟理工学院、淮海工学院、淮阴工学院、江苏第二师范学院、南京大学金陵学院、南理工泰州科技学院等 18 所江苏省高等院校,同时吸收了解放军第二军医大学、湖北工业大学、华东交通大学、湖南文理学院、衡阳师范学院、九江学院等 6 所省外院校,共计 24 所高等学校的化学专业、应用化学专业、化工专业基础理论课一线主讲教师,共同联合编写“高等院校化学化工教学改革规划教材”一套,该系列教材包括《无机化学(上、下册)》、《无机化学简明教程》、《有机化学(上、下册)》、《有机化学简明教程》、《分析化学》、《物理化学(上、下册)》、《物理化学简明教程》、《化工原理(上、下册)》、《化工原理简明教程》、《仪器分析》、《无机及分析化学》、《大学化学(上、下册)》、

《普通化学》、《高分子导论》、《化学与社会》、《化学教学论》、《生物化学简明教程》、《化工导论》等 18 部。

该系列教材适合于不同层次院校的化学基础理论课教学任务需求,同时适应不同教学体系改革的需求。

该系列教材体现如下几个特点:

1. 系统介绍各门基础理论课的知识点,突出重点,突出应用,删除陈旧内容,增加学科前沿内容。

2. 该系列教材将基础理论、学科前沿、学科应用有机融合,体现教材的时代性、先进性、应用性和前瞻性。

3. 教材中充分吸取各校改革特色,实现教材优质资源共享。

4. 每门教材都引入近几年相关的文献资料,特别是有关应用方面的文献资料,便于学有余力的学生自主学习。

该系列教材的编写得到了江苏省教育厅高教处、江苏省高等教育学会、相关高校化学化工系以及南京大学出版社的大力支持和帮助,在此表示感谢!

该系列教材已被评为“十二五”江苏省高等学校重点教材。

该系列教材是由高校联合编写的分层次、多元化的化学基础理论课教材,是我们工作的一项尝试。尽管经过多次讨论,在编写形式、编写大纲、内容的取舍等方面提出了统一的要求,但参编教师众多,水平不一,在教材中难免会出现一些疏漏或错误,敬请读者和专家提出批评和指正,以便我们今后修改和订正。

编委会

2014 年 5 月于南京

前 言

“化工原理”课程作为大化类包括化学工程与工艺、应用化学、生物工程、制药工程、环境科学与工程、环境工程、环境科学、食品科学与工程、高分子材料与工程、过程装备与控制工程、安全工程、测控技术与仪器等专业的学科基础课,它综合运用数学、物理、化学等基础知识,分析和解决化工类型生产中各种物理过程(或单元操作)问题,在本科生从基础课程学习到专业课程学习过程中起着承上启下的作用。该课程的教学水平对化工类及相近专业学生的业务素质 and 工程能力的培养起着至关重要的作用。目前,除化学工程与工艺专业以外,其他化工类专业的化工原理课程课时普遍偏少,为了适应少学时化工原理课程教学的需要,我们编写了这本《化工原理简明教程》教材。

全书共七章,内容包括绪论、流体流动与输送机械、非均相混合物的分离、传热、气体吸收、蒸馏、其他分离技术和固体干燥。每章均附有例题、习题、思考题。此外,本教材注意从典型实例的剖析中提炼若干重要的工程观点,以期提高读者处理实际工程问题的能力。

本书可作为高等学校少学时(70~100学时)化工原理课程的教材,也可作为相关专业的高等职业学校以及科研、设计和生产部门的科技人员的参考书。

本书由赵宜江、李琳主编,参加各章编写工作的有淮阴师范学院赵宜江、周守勇(绪论),江苏大学沈玉堂、杨冬娅(第1章 流体流动与输送机械),南京晓庄学院朱媛(第2章 非均相混合物的分离),淮阴师范学院李梅生(第3章 传热),常熟理工学院王百军、石建东(第4章 气体吸收),湖南文理学院李琳(第5章 蒸馏),淮阴师范学院吴飞跃、朱安峰(第6章 其他分离技术),南京理工大学泰州科技学院顾焰波、张勤(第7章 固体干燥),中国石化集团淮安清江石化有限责任公司嵇岳明、姜航(工程案例)。

本书承蒙南京理工大学钟秦教授主审,对书稿提出许多宝贵意见,在此致以诚挚的感谢。

由于编者水平所限,书中难免出现不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

绪 论	1
§ 0.1 化工过程与单元操作	1
0.1.1 化工过程	1
0.1.2 单元操作	1
§ 0.2 化工原理课程的内容和教学要求	2
§ 0.3 化工原理的研究基础和方法	3
0.3.1 化工过程计算的理论基础	3
0.3.2 化工原理课程的研究方法	4
§ 0.4 单位制与单位换算	4
0.4.1 国际单位制与法定计量单位	4
0.4.2 因次(量纲)	6
0.4.3 单位换算	6
第 1 章 流体流动与输送机械	7
§ 1.1 流体的重要性质	7
1.1.1 连续性假设	7
1.1.2 流体的密度	8
1.1.3 流体的压缩性	9
1.1.4 流体的黏性	9
1.1.5 流体的受力	10
§ 1.2 流体静力学	11
1.2.1 静力学方程	11
1.2.2 压强能和位能	12
1.2.3 流体静力学方程式的应用	12
§ 1.3 管内流体流动	15
1.3.1 流量与流速	15

1.3.2	稳定流动与不稳定流动	17
1.3.3	质量守恒——连续性方程	17
1.3.4	机械能守恒——伯努利方程	18
1.3.5	实际流体管流的机械能衡算式	18
1.3.6	机械能衡算式的应用	19
§ 1.4	流体流动的阻力	20
1.4.1	流体流动的类型	21
1.4.2	阻力损失的分类	22
1.4.3	直管阻力损失	22
1.4.4	局部阻力损失	26
1.4.5	管内流体流动的总阻力损失	29
§ 1.5	管路计算	30
§ 1.6	流量的测量	32
1.6.1	皮托管	32
1.6.2	孔板流量计	34
1.6.3	转子流量计	36
§ 1.7	离心泵	37
1.7.1	离心泵的工作原理	37
1.7.2	离心泵的主要部件	38
1.7.3	离心泵的主要性能参数	39
1.7.4	离心泵的特性曲线及其影响因素	41
1.7.5	离心泵的工作点与流量调节	43
1.7.6	离心泵的汽蚀现象与安装高度	46
1.7.7	离心泵的类型与选用	47
§ 1.8	其他类型化工用泵	49
1.8.1	往复泵	49
1.8.2	齿轮泵	50
1.8.3	旋涡泵	50
§ 1.9	气体输送机械	51
1.9.1	离心式通风机	52
1.9.2	鼓风机	53
1.9.3	压缩机	54
1.9.4	真空泵	57
	习题	58

思考题	62
工程案例	63
本章符号说明	67
参考文献	68
第 2 章 非均相混合物的分离	69
§ 2.1 概述	69
§ 2.2 重力沉降	70
2.2.1 颗粒的特性	70
2.2.2 球形颗粒的自由沉降	71
2.2.3 自由沉降速度计算	73
2.2.4 重力沉降设备	74
§ 2.3 离心沉降	77
2.3.1 离心沉降的速度	78
2.3.2 旋风分离器	79
2.3.3 旋液分离器	82
2.3.4 离心沉降机	82
§ 2.4 过滤	84
2.4.1 过滤操作原理	84
2.4.2 流体流过固定床层	85
2.4.3 过滤基本方程式	87
2.4.4 恒压过滤	90
2.4.5 过滤设备	94
习题	99
思考题	101
工程案例	101
本章符号说明	103
参考文献	105
第 3 章 传热	106
§ 3.1 传热过程概述	106
§ 3.2 热传导	107
3.2.1 傅里叶定律	107
3.2.2 导热系数	108

3.2.3	平壁稳定热传导	110
3.2.4	圆筒壁的热传导	112
§ 3.3	对流传热	114
3.3.1	对流传热分析	115
3.3.2	牛顿冷却定律和对流传热系数	115
3.3.3	对流传热系数	116
3.3.4	无相变对流传热过程	117
3.3.5	有相变对流传热过程	124
§ 3.4	传热过程的计算	127
3.4.1	热量衡算	127
3.4.2	总传热速率方程	128
3.4.3	传热系数和传热面积	129
3.4.4	平均温度差	130
3.4.5	传热效率和传热单元数法	132
§ 3.5	辐射传热	135
3.5.1	基本概念和定律	135
3.5.2	两固体间的辐射传热	137
§ 3.6	换热器简介	140
3.6.1	间壁式换热器的类型	141
	习题	147
	思考题	148
	工程案例	149
	本章符号说明	152
	参考文献	153
第 4 章	气体吸收	154
§ 4.1	概述	154
4.1.1	吸收及其在化工中的应用	154
4.1.2	吸收设备	155
4.1.3	吸收操作的分类	155
4.1.4	吸收剂的选择	156
§ 4.2	气液相平衡关系	157
4.2.1	气体的溶解度	157
4.2.2	亨利定律	158

4.2.3	相平衡关系在吸收过程中的应用	161
§ 4.3	传质机理及吸收过程速率	162
4.3.1	分子扩散与费克定律	162
4.3.2	等摩尔反向扩散	163
4.3.3	单向扩散	164
4.3.4	分子扩散系数	166
4.3.5	单相内的对流传质	167
4.3.6	相际对流传质及总传质速率方程	170
4.3.7	传质系数之间的关系及吸收过程中的控制步骤	171
§ 4.4	填料吸收塔的计算	174
4.4.1	物料衡算和操作线方程	175
4.4.2	吸收剂用量与最小液气比	176
4.4.3	填料层高度的计算	178
4.4.4	吸收塔的操作型计算	185
§ 4.5	解吸	187
4.5.1	解吸操作线与最小气液比	187
4.5.2	解吸塔填料层高度计算	188
§ 4.6	填料塔	189
4.6.1	填料塔的结构与填料	189
4.6.2	填料塔的流体力学性能	193
4.6.3	填料塔塔径的计算	195
4.6.4	填料塔的附属设备	196
	习题	198
	思考题	200
	工程案例	201
	本章符号说明	203
	参考文献	204
第 5 章	蒸馏	205
§ 5.1	概述	205
5.1.1	蒸馏过程概述	205
5.1.2	蒸馏分离的特点	206
5.1.3	蒸馏过程的分类	206
§ 5.2	两组分溶液气液平衡	206

5.2.1	两组分理想物系的气液平衡	207
5.2.2	二元理想物系气液相平衡	208
5.2.3	两组分非理想溶液的气液平衡	211
§ 5.3	蒸馏与精馏原理	211
5.3.1	平衡蒸馏(闪蒸)	211
5.3.2	简单蒸馏	214
5.3.3	精馏	216
§ 5.4	两组分连续精馏的计算	217
5.4.1	理论塔板的概念及恒摩尔流假设	217
5.4.2	物料衡算与操作线方程	218
5.4.3	进料的热状况及选择	221
5.4.4	理论板数的计算	223
5.4.5	几种特殊情况下理论板数的求法	229
5.4.6	回流比的影响及其选择	231
5.4.7	简捷法求理论版层数	234
5.4.8	塔高和塔径的计算	235
5.4.9	连续精馏装置的焓衡算	237
5.4.10	精馏塔的操作与调节	238
§ 5.5	间歇精馏	239
5.5.1	间歇精馏过程的特点	240
5.5.2	馏出液组成恒定的间歇精馏	240
5.5.3	回流比保持恒定的间歇精馏	241
§ 5.6	特殊精馏	241
5.6.1	恒沸精馏	242
5.6.2	萃取精馏	243
§ 5.7	板式塔	244
5.7.1	板式塔的结构	244
5.7.2	板式塔塔板类型	245
5.7.3	板式塔的工艺设计	247
	习题	250
	思考题	253
	工程案例	253
	本章符号说明	255
	参考文献	256

第 6 章 其他分离技术	257
§ 6.1 液液萃取	257
6.1.1 概述	257
6.1.2 液液相平衡原理	259
6.1.3 萃取过程计算	263
6.1.4 萃取设备	269
§ 6.2 超临界萃取	269
6.2.1 超临界流体	269
6.2.2 超临界萃取过程	271
6.2.3 国内超临界二氧化碳萃取装置生产工艺	272
6.2.4 超临界萃取的应用	273
§ 6.3 结晶	273
6.3.1 概述	273
6.3.2 结晶机理与动力学	274
6.3.3 结晶器简介	276
§ 6.4 膜分离技术	278
6.4.1 膜分离技术概述	278
6.4.2 膜分离过程的基本原理及特点	279
6.4.3 各种膜过程简介	281
6.4.4 常规膜结构和组件	286
§ 6.5 吸附分离	289
6.5.1 概述	289
6.5.2 吸附平衡与速率	290
6.5.3 工业吸附方法与设备	295
§ 6.6 分离方法的选择	297
6.6.1 分离方法选择的基本依据	297
6.6.2 分离方法选择的原则	298
习题	299
思考题	301
工程案例	301
本章符号说明	304
参考文献	305

第 7 章 固体干燥	306
§ 7.1 概述	306
§ 7.2 湿空气的性质及湿度图	307
7.2.1 湿空气的性质	307
7.2.2 湿空气的 $H-I$ 图	312
§ 7.3 干燥过程的物料衡算与热量衡算	315
7.3.1 湿物料中含水量表示方法	315
7.3.2 物料衡算与热量衡算	316
7.3.3 干燥器出口空气状态的确定	319
7.3.4 干燥器的热效率	320
§ 7.4 干燥速率与干燥时间	323
7.4.1 物料中水分的性质	323
7.4.2 干燥速率及其影响因素	325
7.4.3 恒定干燥条件下干燥时间的计算	328
§ 7.5 干燥器	329
习题	334
思考题	336
工程案例	336
本章符号说明	340
参考文献	341
附录	342
习题参考答案	373

绪 论

§ 0.1 化工过程与单元操作

0.1.1 化工过程

在化学工业中,将自然界的各种物质经过物理和化学方法处理制造成生产资料(如燃料油、乙烯、合成橡胶、化肥、农药等)和生活资料(如合成纤维、医药和化妆品等)等有用产品的过程称为化工生产过程,简称化工过程。化工产品千差万别,生产工艺也多种多样,但是任一化工生产过程都可概括为原料预处理、化学反应和产物的分离三部分。依据化学反应要求对原料进行预处理,此多为物理过程。例如,固体原料破碎、磨细和筛分;原料提纯,除去有害杂质。化学反应中存在反应不完全及某些反应物的过量,副反应的存在,生产过程的反应产物实际为副产品和产品的混合物等情况,要得到符合规格的产品,需要对产物进行分离和精制。这一步主要也是物理过程,如蒸馏、吸收、萃取、结晶等。化工生产中,原料预处理和产物分离为化工过程的辅助部分,都是化工生产所不可缺少的。即使在一个现代化的大型工厂中,反应器的数目并不多,绝大多数的设备中也都是进行着各种前、后处理操作。前、后处理工序占有着企业的大部分设备投资和操作费用。因此目前已不是单纯由反应过程的优化条件来决定必要的前后处理过程,而必须总体确定全系统的优化条件。由此可见,前、后处理过程在化工生产中的重要地位。当然,化学反应过程是整个化工生产过程的核心,起着主导作用,它决定着原料预处理的程度和产物分离的任务,影响其他两部分的设备投资和操作费用。

0.1.2 单元操作

化工生产由物理过程和化学过程两类过程构成。物理过程按其操作目的分为物料的增(减)压、输送、混合与分散、加热与冷却,以及非均相和均相混合分离等几种。考虑到被加工物料的不同相态、过程原理和采用方法的差异,还可将物理过程进一步细分为一系列的遵循不同物理定律,具有某种功用的基本操作过程,称之为单元操作,如表 0-1 所示。

表 0-1 常用单元操作

类别	单元操作	目的	原理	传递过程
流体动力过程	流体输送 沉降 过滤 搅拌	液体、气体的输送 非均相混合物分离 非均相混合物分离 混合或分散	输入机械能 密度差异引起的相对运动 介质对不同尺寸颗粒的截留 输入机械能	动量传递
传热过程	换热 蒸发	加热、冷却或变相态 溶剂与不挥发溶质分离	利用温度差交换热量 供热汽化溶剂并将其及时移除	热量传递
传质过程	蒸馏 气体吸收 萃取 浸取 吸附 离子交换 膜分离	液体均相混合物分离 气体均相混合物分离 液态均相混合物分离 用溶剂从固体中提取物料 流体均相混合物分离 从液体中提取某些离子 流体均相混合物分离	各组挥发度的差异 各组分在溶剂中溶解度不同 各组分在萃取剂中溶解度不同 固体中组分在溶剂中溶解度不同 固体吸附剂对组分吸附力不同 离子交换剂的交换离子 固体或液体膜的截留	质量传递
热质传递过程	干燥 增、减湿 结晶	固体物料去湿 调节控制气体中水汽含量 从溶液中析出溶质结晶	供热汽化液体并将其及时移除 气体与不同温度的水接触 利用物质溶解度的差异	热质同时传递

每一种单元操作都概括了化工生产过程中一类具有共性的操作,如硫酸中 SO_2 炉气杂质湿法净化、 SO_3 的吸收、合成氨中半水煤气的湿法脱硫及水洗脱 CO_2 等,都是分离气体混合物的单元操作,共同遵循吸收的原理,使用同类型的设备。

化工生产过程是由若干个单元操作和化学反应过程构成的一个整体。单元操作中所涉及的原理虽然各异,但是它们所遵循的物理规律,从本质上可归纳为动量传递、热量传递和质量传递三种传递过程。传递过程是联系单元操作的一条线索,成为化工学科研究的主要对象之一。三种传递过程和反应工程,即所谓的“三传一反”构成了贯穿于化学工程学科研究的一条主线。

§ 0.2 化工原理课程的内容和教学要求

化工原理是研究除化学反应以外的诸物理操作步骤原理和所用设备的课程。化工原理是化工类、轻工、医药类专业学生的技术基础课,是一门应用性学科。其主要内容是研究各化工单元操作的基本原理、典型设备的构造及工艺尺寸的计算或造型,并能用以分析和解决工程技术中的一般问题。计算包括设计型计算和操作型计算两种。设计型计算是指对给定的任务计算出设备的工艺尺寸;操作型计算是指对已有的设备进行查定计算。

本课程教学将化工单元操作按过程共性归类,以“三传”为主线开展教学。即以动量传